DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170423

张琳, 邵景安. 未来 30 年川东平行岭谷区县域农田 SOC 动态模拟[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170423
Zhang L, Shao J A. Dynamic simulation of farmland SOC in parallel ridge valley area in Eastern Sichuan in the next 30 years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170423

未来 30 年川东平行岭谷区县域农田 SOC 动态模拟*

张　琳, 邵景安**

(重庆师范大学地理与旅游学院/三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室　重庆　400047)

摘　要: 以位于川东平行岭谷的典型县——垫江县为研究对象, 探讨在特定气候模式下未来 30 a 研究区农田土壤有机碳(SOC)及其动态变化, 为研究区未来耕地可持续利用与管理提供数据支持和科学依据。利用生物地球化学模型 DNDC, 选取 IPCC AR4 报告中的 BCCR_BCM 2.0 的 B_1 模式, 在基于研究区土壤性质和农业管理制度等建立的 GIS 区域数据库的支持下, 模拟研究区 2011—2041 年 SOC 动态变化。结果表明: ①DNDC 模型能够较好地模拟特定气候条件下土壤有机碳及其动态变化, 模拟值和观测值的相关系数 r 为 0.981, 达到 0.01 水平下的极显著相关关系; 模拟值和观测值的 RMSE 值为 16%, 模拟结果较好。②未来 30 a 研究区农田 0~20 cm 土层 SOC 密度和储量均呈显著增加态势, 单位面积碳增量 2 637.07~8 091.55 kg(C) hm^{-2}, 增幅为 10%~34%, 新增固碳量 2.7×10^5~8.3×10^5 t, 年均增速 87.9~269.7 kg(C) $hm^{-2}\cdot a^{-1}$; ③未来 30 a 川东平行区县域农田土壤总体呈持续碳增汇状态, 研究区固碳、丢碳以及相对平衡三者间的差异将逐渐凸显。

关键词: 农田土壤; 土壤有机碳; DNDC 模型; 动态模拟; 固碳量; 川东平行岭谷区
中图分类号: K903　　**文献标识码:** A

Dynamic simulation of farmland SOC in parallel ridge valley area in Eastern Sichuan in the next 30 years*

ZHANG Lin, SHAO Jingan**

(Department of Geography and Tourism, Chongqing Normal University / Key Laboratory of Surface Processes and Environmental Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400047, China)

Abstract: The relationship between greenhouse gas emission reduction and soil carbon sequestration has become the focus of global climate change research amidst the worsening global climate change. As a core interface of terrestrial ecosystem, farmland soils have a huge potential to sequester carbon. Exploring the response and feedback of the dynamic balance of farmland soil organic carbon (SOC) to global climate change is significant in understanding the relationship between global carbon cycle and agricultural ecosystems. Dianjiang County is a typical representation of parallel ridge valley area in Eastern Sichuan. It is an important grain and oil producing areas in Chongqing. In the process of transformation from traditional to modern agriculture, the area has been faced with double pressures of food security and increasing farmland SOC. Therefore in this region, it is very important to study farmland SOC and its dynamic change using specific climate model in the next 30 years. It provides data support and scientific basis for sustainable utilization and management of future cultivated lands in the study area. Supported by GIS regional database established for soil properties and agricultural management system, this study simulated the dynamic change in SOC in the study area for the period 2011–2041 using the biogeochemical model DNDC. The study also used the B_1 climate model within BCCR_BCM 2.0 in the IPCC AR4 report. The results showed that: (1) The DNDC model fairly simulated farmland SOC and dynamic change under specific climate conditions. The correlation coefficient between the simulated and measured values was 0.981, which was significant at the 0.01 confidence level. The RMSE value of the simulated and measured values was 16%, indicating better simulated results. (2) The SOC density and storage in the 0–20 cm soil layer in the study area

* 国家自然科学基金重大国际合作基金项目(41161140352)资助
**通讯作者: 邵景安, 主要从事土地利用与生态过程研究, E-mail: shao_ja2003@sohu.com
张琳, 主要从事资源环境与城乡规划研究, E-mail: 15922809691@163.com
收稿日期: 2017-06-05　接受日期: 2017-08-02
* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41161140352).
**Corresponding author, E-mail: shao_ja2003@sohu.com
Received Jun. 5, 2017; accepted Aug. 2, 2017

significantly increased for the next 30 years. The increase in carbon per unit area was 2 637.07–8 091.55 kg(C) hm^{-2} or 10%–34%, that in carbon sequestration was 2.7×10^5–8.3×10^5 t, and that in average increase rate was 87.9–269.7 kg(C) $hm^{-2}\cdot a^{-1}$. (3) For the next 30 years, the farmland soil in parallel ridge valley area in Eastern Sichuan was generally under continuous carbon sink. In the study area, the differences among carbon sink, carbon loss and carbon relative balance gradually increased for the next 30 years.

Keywords: Farmland soil; Soil organic carbon; DNDC model; Dynamic simulation; Carbon sequestration; Parallel ridge valley; Eastern Sichuan

随着全球气候变化的日趋严峻，温室气体减排和土壤碳的固存关系成为全球气候变化研究的热点[1]。土壤固碳是一项重要的固碳减排措施，研究土壤有机碳(SOC)的动态平衡对全球气候变化的响应与反馈，对深入了解全球碳循环和农业生态系统具有重大影响。累计文献发现，早期的研究主要是根据剖面数据进行土壤碳储量的估算[2-3]，如Post[4]根据全球2 696个土壤剖面估计全球土壤有机碳约为$1.4\cdot10^{12}$ t，土壤碳储量约占陆地生态系统碳储量的2/3；王绍强等[5]依据第2次全国土壤普查统计资料，估算中国陆地总SOC储量约为$9.24\cdot10^{16}$ g。且伴随研究的进一步深入，越来越多的学者利用土壤数据库、3S技术优化碳库估算和时空甄别[6]，侧重于SOC时空分布特征与影响因素方面探索。揣小伟等[7]借助GIS对江苏省1985—2005年表层土壤碳密度进行核算，探讨了土地利用变化对土壤碳储量的影响；赵永存等[8]运用多元线性回归、泛克里格和回归克里格3种方法预测了河北省SOC密度的空间分布格局。SOC对环境条件的动态响应和自身转化的过程具有复杂性，其周转过程非常缓慢，由于时间和空间的局限，现有的田间试验无法揭示不同环境条件下农田SOC的动态变化。近年来模型的应用在一定程度上解决了SOC演变的模拟与预测难题。韩东亮等[9]利用DNDC模型预测了新疆灰漠土农田SOC的动态变化，李悦等[10]借助DAYCENT模型对东北地区不同农作管理措施下农田SOC未来变化进行了模拟研究。气候在时空上的复杂性与异质性以及人类活动的频繁干扰，多重因素使得SOC与全球气候变化的相互作用在现有研究中仍存在较大的争议性，预测未来气候变化下SOC动态变化对深入理解陆地生态系统与全球气候变化之间的相互作用有积极重要的意义。就目前而言模型模拟的途径是研究未来土壤碳储藏变化的重要手段，DNDC (DeNitrification-DeComposition)模型是利用数学模型研究生物地球化学循环过程，模拟陆地生态系统中碳、氮和水循环的动态模型[11]，现已被广泛应用于农业土壤肥力与温室气体排放的预测研究中，且逐渐被认为是目前较为典型的能对土壤固碳强度、多种气体排放等过程进行详尽模拟的模型。

垫江县是川东平行岭谷区的典型代表，是重庆市重要粮油产区之一，在传统农业向现代农业转型过程中，该区面临担负粮食安全和增加农田SOC的双重压力。鉴于此，本文以垫江县为研究区，在课题组对研究区1980—2011年SOC动态变化[12]研究的基础上，根据第2次土壤普查和2011年SOC实测值对DNDC模型进行参数校正，选取IPCC AR4报告中的BCCR__BCM 2.0的B_1模式，开展2011—2041年研究区SOC的动态变化模拟，结果有利于将类似区域的耕地利用提升到区域应对全球气候变化和保障粮食安全战略的实施层面，为未来耕地可持续利用的实践提供数据支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

研究区域垫江县位于重庆东北部川东平行岭谷区的核心区(29°38'~30°31'N，107°13'~107°38'E)，面积1 518 km^2(图1)。地处华蓥山脉东部，以构造地貌为主，东西部山岭耸峙，山间槽地交错，中部高滩河纵贯，系列溪河、小冲沟、平坝镶嵌，形成绵亘起伏的丘陵，海拔320~1 183 m。地势北高南低，以平坝和浅丘为主。气候属于亚热带湿润气候区，年均温17 ℃，年均降水量1 183 mm，无霜期289 d，适宜于多种作物种植。土壤类型以紫色土、水稻土、黄壤和冲积土为主，水稻土面积4.36万hm^2，占耕地资源的42.7%。研究区的平坦地形和便捷的交通，使得该区成为重庆市传统农业向现代农业转型的重点县，为配合这一转型，该区被纳入重庆市高标准基本农田建设的重点县，因此该区在川东平行岭谷区具有显著的代表性。为此，该区一方面要担负起重庆粮仓的重要功能，通过加大对农业的基础设施建设(如土地平整、路沟(渠)池凼等)和农用物资(化肥、有机肥、机械等)的投入，在提高劳动生产率、增加耕地产出等方面获得了很好的成效；另一方面这一投入也会对农田土壤产生较大程度的扰动，如土地平整、机械翻耕等。从农田SOC的保持看，在这一区域具有改善与扰动的双重作用，是研究平行岭谷区传统农业向现代农业转换中SOC变化的代表性区域。

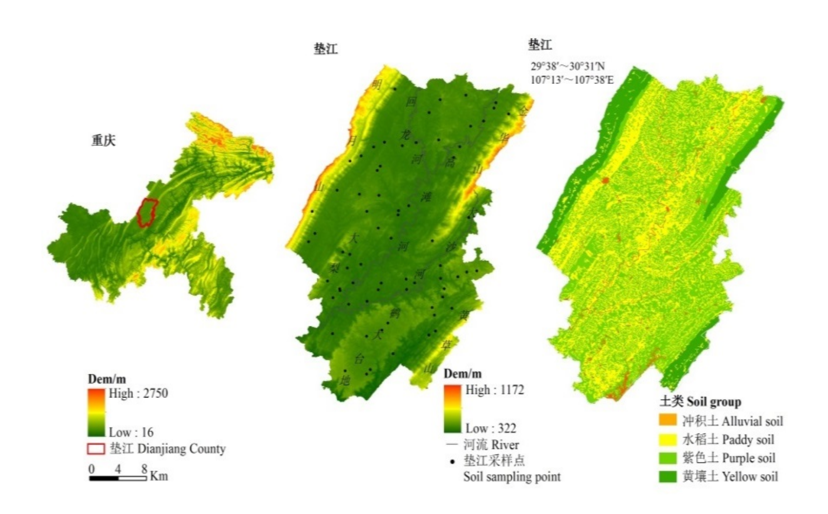


图 1　研究区垫江县位置、数字高程模型土壤采样点和耕地土壤类型分布

Fig. 1　Location of Dianjiang County and its DEM, soil sampling site and farmland soil distribution

1.2　数据获取与设置

1)土壤数据: 1980 年全国第 2 次土壤普查数据来源于垫江县农业局, 提取并建立土壤空间数据库所需要的属性数据, 缺少的部分用《垫江县土种志》补缺。2011 年实测样点分析数据, 以第 2 次土壤普查原采样点为参考, 用原始采样点记录中的点位描述(如土壤类型、地名、河流、海拔等), 在 ArcGIS 10.2 中对采样点展开再定位, 在原采样点及其附近寻找同一土种类型布设土壤采样点。依据垫江县第 2 次土壤普查数据, 计算各采样点土壤理化性状(如有机碳含量、黏粒、pH、容重等), 将计算出的对应值作算术平均记作为每一采样点理化性状的最终值。

2)气象数据: 1980—2011 年逐日气象数据(降水、气温等)由重庆市气象局、垫江县及周围 6 个气象站点提供, 2011—2041 年的逐日气象数据采用 IPCC AR4[13]报告中的 BCCR__BCM 2.0 的 B_1 气候模式进行设置。根据模型需要将气象数据设置成日最高气温、日最低气温及日平均降水量。

3)作物数据: 来源于垫江县统计年鉴, 选择播种面积比较大的 6 种种植制度(冬小麦-夏玉米、水稻-油菜、玉米-红薯、玉米-黄豆、辣椒-土豆、水稻-豆角), 进行模型作物子模块的参数设置。作物的播种、灌溉、收割和施肥等种植制度和管理措施, 根据垫江县物候记载和野外调查数据进行综合设置。

4)图形数据: 1980 年和 2011 年的耕地资源分布图、行政区划图均由垫江县国土局提供。采用 ArcGIS 10.2 与 SigmaPlot 处理图形, Microsoft Excel 和 SPSS 17.0 统计计算。

1.3　DNDC 模型参数设置

DNDC 模型版本为 9.5。DNDC 模型是将碳、氮循环的物理、化学及生物过程用计算机技术组织起来, 建立在理论分析和试验观测基础上的一个理想化的生态系统, 需要用实测数据验证其是否具备真实生态系统的特征。然而, 尽管模型的每一个过程都需以理论或观测数据为依据, 并在众多农田生态系统中得到了验证, 但是土壤碳、氮循环过程十分复杂, 具有较强的时空差异性, 而且模型涉及参数繁多(如气象、土壤、施肥等), 加之模型原本采用的参数缺省值主要来源于欧美地区的观测结果, 在任何特定的时空尺度应用时, 需通过实测对部分影响碳、氮循环过程的重要参数进行本地化及模拟结果验证。为此, 研究需要对模型的一些重要参数特别是土壤输入库中的土壤参数进行修改和本地化(表 1), 对模型中已有作物的默认参数进行修改, 如水稻、小麦、玉米、大豆作物各部分 C/N、作物各部分比例等。首先设置模型中土壤和作物生理参数, 然后将所需气象、土壤及田间管理等参数输入模型, 并运行, 比较模型模拟的各种作物类型生物量和 SOC 动态变化结果与田间实测结果的拟合度, 并且还需多次调整 DNDC 模型中的部分参数, 以使模型模拟结果与田间实测值拟合程度达到最佳。

表 1　DNDC 模型部分本地化参数值

Table 1　Localized values of some parameters of DNDC model

参数 Parameter	中文对照 Chinese reference	缺省值 Default value	本地化值 Localized values	依据 Basis
Clay fraction	黏粒含量	0.09	0.22	实测 Observed
Wilting	凋萎点	0.20	0.18	实测 Observed
Porosity	孔隙度	0.435	0.476	实测 Observed
SOC decrease rate	表层以下土壤有	0.50	0.27	实测 Observed

below topsoil	机质减少速度

以乡(镇)为基本模拟单元，将土壤图斑数据库与垫江县行政区划图叠加，产生新的村界图斑数据库。按DNDC 区域模式缺省数据库的构建方法，以图斑为基本模拟单元和控制区域，用地统计分析(Geo-statistical Analyst)对乡(镇)村界图斑的土壤属性(初始 SOC、黏粒含量、pH、容重等)进行克里金插值，提取土壤属性中各属性值的均值、最大(小)值。用 ArcGIS 10.2 空间插值功能得到模拟单元内各作物氮肥和农家肥投入及秸秆还田的空间分布，形成县域土壤数据库。

DNDC 模型与 GIS 数据库通过唯一 ID 识别码连接，用垫江县多年观测数据率定 DNDC 模型参数，开展农田SOC由点位到区域的模拟，并在点位和区域尺度对DNDC模型进行验证，用区域模拟结果与实测数据建立环境关系模型，对残差进行拟合，以实现 SOC 模拟尺度的扩展。

1.4　数据分析

影响 SOC 密度的因素涉及地形、土壤理化性状、施肥、管理、生物及气候等[14-17]:

1)SOC 密度初始值的高低直接影响 SOC 的变化，其值越大，变化速率越慢[15]。为此，2011 年的 SOC 密度是分析未来 30 a 垫江县 SOC 密度动态变化的首要考虑因素。

2)地形起伏对土壤理化性状的空间分异有很大影响，尤其是海拔和坡度[14-16]。坡度大小和海拔高低决定人为扰动胁迫的程度，影响土壤成土过程，进而影响 SOC 的空间分异。

3)土壤理化性状是土壤环境中较为稳定且变化较慢的因素，在影响 SOC 动态变化的影响因素识别过程中，是必需考虑的重要方面。物理性状中如容重和砾石含量对 SOC 的影响较显著；化学性状中除 pH 外，有效磷、全(氮、磷和钾)、C/N 比等，均对 SOC 有正向影响[17]。这类影响因子中，主要选择容重、砾石含量、质地、有效磷、全(氮、磷和钾)、C/N 比等。

4)化肥(磷、氮和钾)能增加土壤养分元素，有机肥施用会增加有机质含量。

5)作物产量高意味着作物生长好，其产生的枯枝落叶较多，会增加土壤的有机质含量，留茬和秸秆还田亦是如此，直接增加土壤有机质，进而增加 SOC 含量[14]。

6)气象数据对模型输出结果有重要影响，如降雨量、大气温度等对土壤剖面的温度、湿度、氧化还原电位、碳、氧等有直接影响。研究将未来 30 a 的土壤管理设置为常规管理模式，气象因素及受气象因素影响的作物生长状况是未来 30 a 影响 SOC 储量变化的主要影响因子。

以点位模拟为基础、实测值为依据率定模型参数，开展区域模拟。用 DNDC 模型实施点位和区域模拟，须事先获取区域所有格点所需输入数据，将其存储于特定 GIS 和通用数据库中[18]。GIS 数据涵盖待模拟区所有多边形和格点信息，如地理位置、气象数据、土壤性质、种植制度、农田管理等。通用数据，如植物生理/物候、土壤水热性能等参数。为支持 DNDC 模型运转，首先生成以村为最小单元的栅格，建立空间数据库，并假设这些栅格性质是均质的，以实现对各个栅格的统一模拟；其次假定每个栅格内的特征是一致的，每个基本单元含有且仅有一组模型所需输入参数，再在每一基本单元模拟的基础上求和[19-20]。在县域尺度，首先进行 DNDC 点位模拟，以此率定模型参数，再以垫江县第 2 次土壤普查、自然环境等作为初始模拟数据，以土壤图斑法，结合野外实测农田管理数据建立县域尺度 1∶5 万数据库，用 DNDC 模型模拟未来 30 a 县域尺度 SOC 情景。此基础上，用垫江县 40%的实测样点作为验证数据，验证 DNDC 模型模拟结果的准确性。

1.5　SOC 模拟结果与精度验证

点位模拟中主要选择作物生物量和 SOC 为验证指标，冬小麦-夏玉米、水稻-油菜是垫江县典型的作物轮作制度，对其进行了长期稳定观测和土壤理化性状分析。以实测土壤理化性状、实测气象资料、农田管理信息为 DNDC 模型的输入数据，将模拟得到的产量值、SOC 与实际观测值对比验证模型的准确性。据实际观测，以冬小麦常规施肥、减量施肥、不施肥的 2003 年、2008 年、2011 年的实测数据及水稻常规施肥的 2005 年、2009 年、2011 年的实测数据对模型进行验证。前者以 2003 年为初始状态，用冬小麦-夏玉米旱地 SOC 实测数据；后者以 2005 年为初始状态，用水稻-油菜水田 SOC 实测数据，耦合气象资料和农田管理信息运行模型。

表 2 所示，2008 年小麦产量模拟值与实测值相对误差最大，为−30.7%~−12.2%，均相对误差−16.2%，模拟结果较差，其中不施肥处理相对误差最大。2011 年模拟值与实测值较接近，介于−17.8%~−1.7%，均相对误差−2.7%，模拟结果相对可行，3 种情景下模拟值皆低于实测值。表 3 可知，2008 年小麦田 SOC 模拟值与实测值相对误差为 1.75%~16.75%，均相对误差 9.1%。2011 年旱地 SOC 模拟值与实测值相对误差为−2.18%~9.66%，均相对误差 3.1%。模型模拟初期，模拟值皆低于实测值，原因在于 2003 年前垫江县尚未开展试验观测，所有地块均进行常规施肥处理，之后才实施差别化施肥处理，从而使得 2011 年模拟值越来越

接近实测值，且伴随模拟时间的延长，模型越趋于稳定。表 2 与表 4 显示，2009 和 2011 年水稻模拟值与实测值相对误差较小，分别为 7.5%、–5.9%，模拟结果较理想。2009 和 2011 年水田 SOC 模拟结果也较好，模拟值与实测值相对误差分别为 7.5%和–7.1%。

表 2 DNDC 模型模拟的不同施肥处理下小麦产量及常规施肥下的水稻产量与实测产量的对比

Table 2 Comparison between simulated and measured wheat yield under different fertilization treatments and rice yield unde conventional fertilization treatment

作物 Crop	年份 Year	施肥处理 Fertilization treatment	实测平均产量 Measured average yield (kg·hm^{-2})	模拟产量 Simulated yield (kg·hm^{-2})	相对误差 Relative error (%)
小麦 Wheat	2008	常规施肥 Conventional fertilization	1 520	1 334	–12.2
		减量施肥 Balanced fertilization	1 564	1 331	–14.9
		不施肥 None fertilization	547	379	–30.7
	2011	常规施肥 Conventional fertilization	1 616	1 557	–3.6
		减量施肥 Balanced fertilization	1 452	1 428	–1.7
		不施肥 None fertilization	670	651	–17.8
水稻 Rice	2009	常规施肥 Conventional fertilization	3 032	2 804	–7.5
	2011	常规施肥 Conventional fertilization	3 169	2 981	–5.9

表 3 DNDC 模型模拟与实测的 2008 年和 2011 年小麦田不同施肥处理土壤有机碳(SOC)对比

Table 3 Comparison between simulated and measured soil organic carbon (SOC) contents under different fertilization treatments in wheat field in 2008 and 2011

施肥处理 Fertilization treatment	2003 年初始 SOC Initial value in 2003 (g·kg^{-1})	2008			2011		
		实测值 Observed value (g·kg^{-1})	模拟值 Simulated value (g·kg^{-1})	相对误差 Relative error (%)	实测值 Observed value (g·kg^{-1})	模拟值 Simulated value (g·kg^{-1})	相对误差 Relative error (%)
常规施肥 Conventional fertilization	4.78	5.14	5.23	1.75	5.51	5.39	–2.18
减量施肥 Balanced fertilization	4.52	5.73	6.69	16.75	5.80	6.36	9.66
不施肥 None fertilization	4.06	4.91	5.30	7.90	5.02	5.07	0.10

表 4 DNDC 模型模拟与实测的 2009 年和 2011 年水稻田常规施肥土壤的有机碳(SOC)含量对比

Table 4 Comparison between simulated and measured soil organic carbon (SOC) contents under conventional fertilization treatment in the paddy field in 2009 and 2011

2005 初始 SOC Initial value in 2005 (g·kg^{-1})	2009			2011		
	实测值 Observed value (g·kg^{-1})	模拟值 Simulated value (g·kg^{-1})	相对误差 Relative error (%)	实测值 Observed value (g·kg^{-1})	模拟值 Simulated value (g·kg^{-1})	相对误差 Relative error (%)
4.9	6.23	6.7	7.5	8.64	8.02	–7.1

利用校正后的土壤性质和作物系数，模拟垫江县 1980—2011 年农田 SOC，将模拟均值与各采样点观测值对比检验，本研究采用相关系数(r)和相对 RMSE(root mean square error)验证 DNDC 模型的区域尺度适宜性。其中 RMSE 的计算公式如下:

$$RMSE_n = \frac{100}{OBS_i}\sqrt{\sum (OBS_i - SM_i)^2 / n} \tag{1}$$

式中: OBS_i为观测值, SM_i为模拟值，n 为样本容量。RMSE 的值越小，表示模拟值与实际值的一致性越好。一般参考为: RMSE<10%，表明模拟值与预测值一致性非常好；在 10%~20%之间为较好；在 20%~30%之间表明模拟效果一般；>30%则表明模拟值与实际值偏差较大，模拟效果较差[19]。

研究区农田表层 SOC 含量的 DNDC 模拟值与田间实测值表现出较为一致的变化趋势，二者相关系数 r 为 0.981，达到了 0.01 水平下的极显著相关关系，模拟值和观测值的 RMSE 值为 16%。由此而言，DNDC 模型模拟的效果良好，利用 DNDC 模型模拟垫江县 2011—2041 年农田 SOC 趋势变化是可行的。

2 结果与分析

2.1 SOC 密度和储量动态变化

SOC的转化是一个长期而又复杂的过程，本文利用DNDC模型，选择IPCC AR4报告中的BCCR_BCM 2.0的B1模式，对垫江县2011—2041年的未来30 a土壤有机碳进行模拟预测，模拟中假设模拟时间内耕作管理方式完全相同。模拟结果(图2)表明：2011—2041年垫江县农田0~20 cm土层SOC密度和储量均呈显著增加趋势。模拟的2041年的SOC密度为2011年原始密度的110%~134%，SOC密度变化为2 637.07~8 091.55 $kg(C)\cdot hm^{-2}$。不同土壤类型 SOC 增减幅度有所差异，增幅最大的是垫江县面积第 4 的冲积土，增幅达130%~151%。增幅最小的是重庆普遍发育的紫色土，增幅为–9%~–7%，面积第2的水稻土和面积第3的黄壤土增幅分别为30%~42%和20%~ 30%。

2011—2041年垫江县SOC储量变化整体上与SOC密度的变化趋势一致，模拟2041年SOC储量约为2011年原始值的110%~168%，新增固碳量在2.7×10^5~8.3×10^5 t之间。由于面积的影响30 a农田不同土壤类型SOC储量变化与SOC密度变化有所不同。单位面积碳增量最大的冲积土，因其面积比较小致使新增固碳量亦较小，而占耕地面积最大的紫色土和第2的水稻土，总体决定垫江县农田SOC的盈亏。

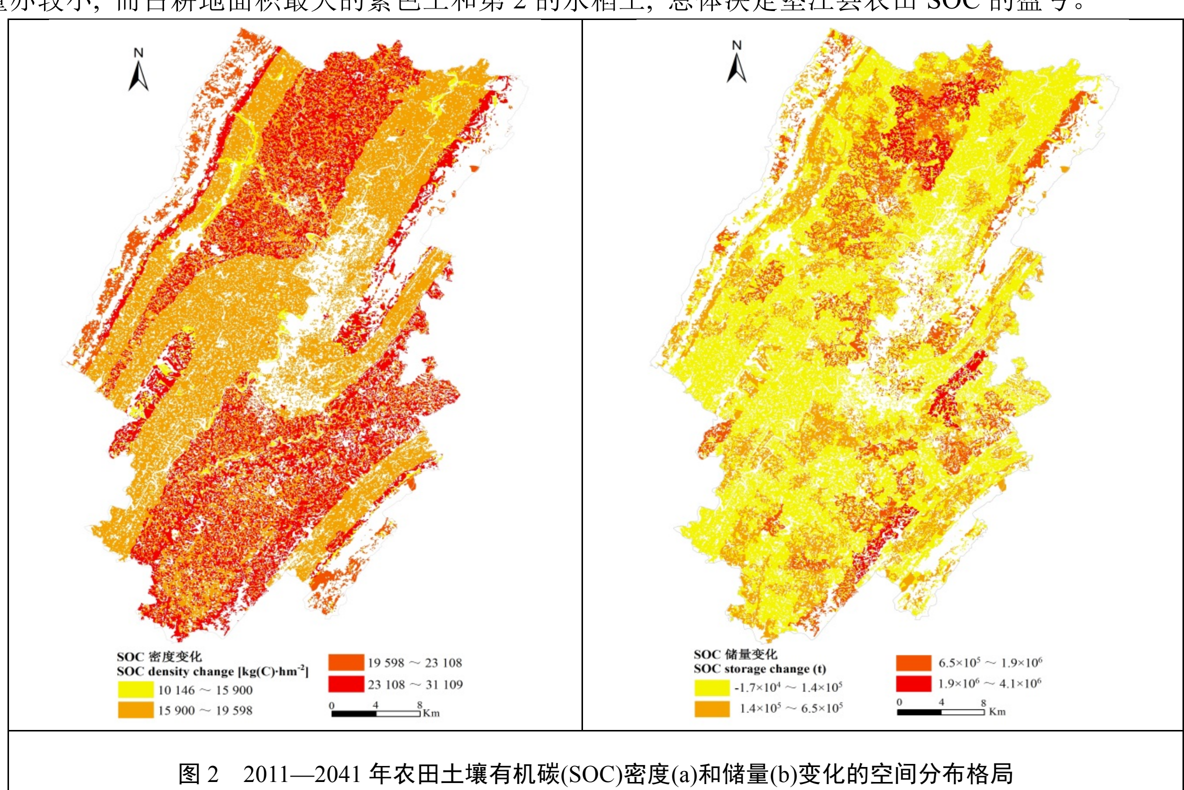


图2 2011—2041年农田土壤有机碳(SOC)密度(a)和储量(b)变化的空间分布格局

Fig. 2 Spatial patterns of soil organic matter (SOC) density (a) and storage (b) during 2011–2041

垫江县未来30 a农田SOC密度变化总体呈西北、东南高，中间低的空间分布格局，变化的高值表现在研究区西北和东南方，变化的低值表现在研究区中部。这与垫江县的骨架地势相一致，增幅最大的处于三大山系(明月山、金华山和黄草山)及其周围区，其次是中部高滩河左上游流域、大沙河右下游流域、南部及鹤大台地区，最低的是明月和金华两山所夹槽谷区的交错地带。垫江县SOC储量变化的空间格局与密度变化的分布格局有细小差别，储量增加最明显区位于北部回龙河上流沿岸的河谷平坝区和金华山西南段，其次是三大山系及其周围区，增量最小的是明月山与回龙河所夹槽谷及金华山与高滩河所夹槽谷区。

2.2 SOC 密度和储量年均变化速率及丢固碳分布特征

未来30 a垫江县SOC密度和储量的变化速率整体均呈增加趋势(图3)。2011—2041年农田0~20 cm土层SOC密度模拟年均增加速率为87.90~269.72 $kg(C)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$，高于1989—2011年的相应年均增长率72.11 $kg(C)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$，增幅最小为21.90%，总体呈较明显的碳增汇效应。垫江县农田SOC储量变化速率与相应时间段SOC密度变化速率趋势相一致，其年均增长速率8.9×10^3~2.8×10^4 $t\cdot a^{-1}$，远高于1989—2011年的相应年均增长速率7 373.31 $t\cdot a^{-1}$。未来30 a垫江县农田SOC密度和储量的变化速率在不同土壤类型间差异明显。SOC 密度年均增长速率最大的是冲积土，达 377.9~494.2 $kg(C)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$；其次是水稻土，达到 288.0~401.2 $kg(C)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$；再次是与水稻土相差不大的黄壤土，达260.0~491.2 $kg(C)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$；最小的是紫色土，增长速率为–186.1~–51.9 $kg(C)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$。与1989—2011年农田SOC密度在不同土壤类型间的年均增长速率[冲积

土 535.00 kg(C)·hm^{-2}·a^{-1}、黄壤土 133.46 kg(C)·hm^{-2}·a^{-1}、水稻土 218.48 kg(C)·hm^{-2}·a^{-1} 和紫色土−50.64 kg(C)·hm^{-2}·a^{-1}]比较，冲积土增长速率有所降低，黄壤土增长速率大幅度提高，水稻土增长速率微弱提高，紫色土增长速率出现降低。

究其原因，土壤所能容纳SOC量是有限的，过去30 a冲积土SOC密度增长速率原本较大，达到某一峰值后会逐渐减低。而黄壤土增长速率较小且处于上升阶段，换言之，其所能容纳SOC能力的空间较大。水稻土因人为长期耕作扰动，SOC 容纳能力处于相对稳定状态，波动较小。紫色土由其本身理化性状决定的 SOC 容纳能力难以突破。SOC 储量变化速率也呈较明显地增长趋势，且不同土壤类型间的差异既受 SOC 密度变化的影响，也受对应土壤类型面积的控制。与水稻土相比，冲积土虽然SOC密度年均变化速率最大，但其面积较小(仅为水稻土的0.23%)，SOC储量变化速率仅为水稻土的SOC储量变化速率的4%，两者相差甚远。在SOC的管理中，不但要考虑SOC密度的提升空间和潜力，也要考虑土壤类型的面积占比，两者结合才能从总体上提升SOC含量。

以2011—2041年SOC储量变化量占2011年储量比重定义：固碳(>5%)、丢碳(<−5%)、介于两者间视为相对平衡。以此划分，垫江县农田土壤固碳、丢碳和相对平衡面积比分别为58.14%、31.62%和10.24%，从整体来看(图3)，未来30 a垫江县农田土壤固碳与相对平衡的面积之和占总面积的2/3，丢碳面积仅占1/3，与农田 SOC 储量显著增加的趋势相一致。进一步细分，固碳幅度为30.19%的水稻土，其固碳面积比较大，为84.60%，面积上的优势使得其成为垫江县农田碳增汇关键。黄壤土的固碳面积略高于丢碳面积，占比分别为57.00%和43.00%。紫色土固碳面积为26.08%，丢碳面积为58.72%，相对平衡面积仅15.20%，因其丢碳面积显著大于固碳面积，这在很大程度上影响县域尺度的农田碳增汇效应。垫江县未来30 a农田土壤的碳源/汇主要由水稻土和紫色土间的碳效应所决定，且对所有土壤类型来讲，未来30 a农田SOC储量变化没有表现出单一的丢碳、固碳或相对平衡格局，而是丢碳与固碳同时并存或丢碳、固碳与平衡三者同时存在。原因是影响农田SOC储量变化的因素繁多，同一演化时期内，固碳、丢碳和相对平衡状态共存是由多种因素共同作用的结果。

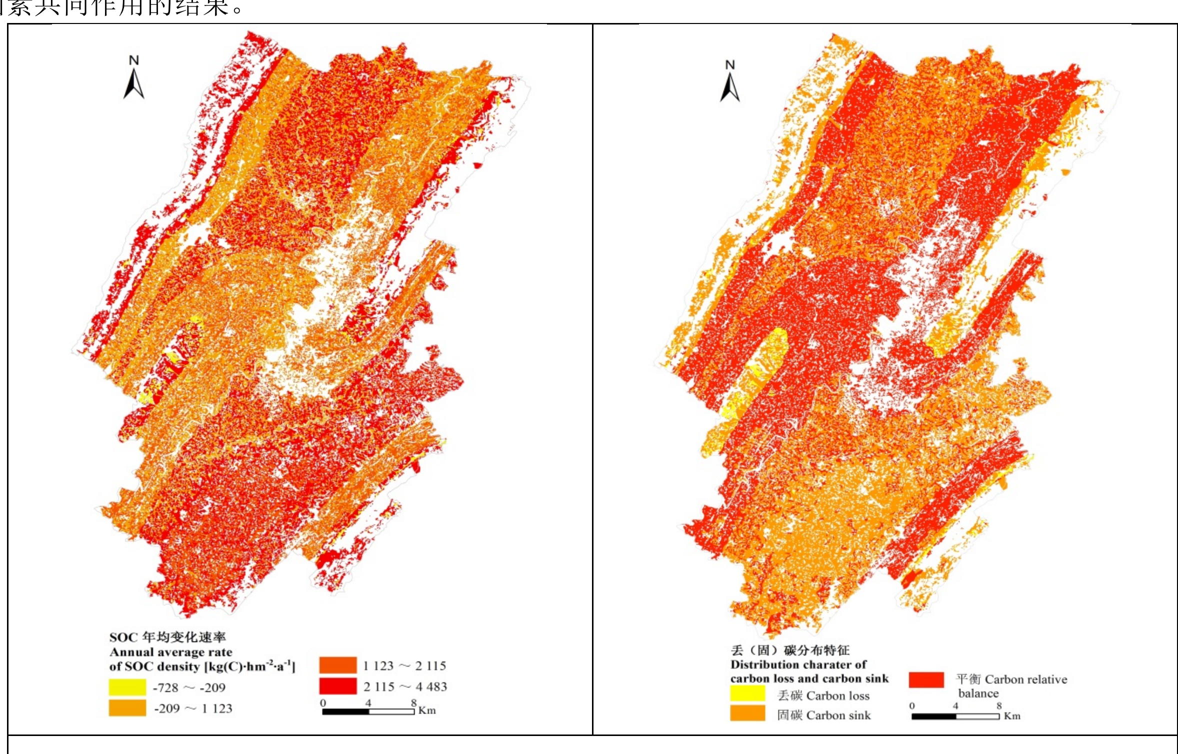


图3　2011—2041年土壤有机碳(SOC)密度(a)和储量(b)的年均变化速率空间格局

Fig. 3　Spatial patterns of annual average rate of soil organic carbon (SOC) density (a) and carbon sink, loss and relative balance (b) during 2011–2041

未来30 a垫江县农田土壤固碳主要表现在研究区的东南、西北部，丢碳和相对平衡情况主要表现研究区的中部，呈现出东南、西北部固碳和中部丢碳的分布格局(图3)。固碳区集中于鹤大台地中南部、三大主体山系(明月山、金华山和黄草山)及零星散布在回龙河所在槽谷平坝区。相对平衡区集中在西部明月山右下缘槽谷区、高滩河与回龙河所夹平坝区、高滩河下游以西以北区、黄草山紧靠下缘的以西以北区。丢碳主要发生在明月山与下缘槽谷的交错区及金华山南段、鹤大台地北段。丢碳区普遍属于山系下缘与槽谷平坝交错带，坡度起伏较大，不利于无机、有机肥的施用与耕作管理，作物长势与产量相对较低，地上凋零物

和地下部分相对较少，致使农田 SOC 储量的变化整体呈丢碳状态。相反地，固碳区为平坝区和主体山系下缘，前者利于无机、有机肥投入及耕作的管理，后者地上凋零物和地下部分较丰富，则利于 SOC 储量的提升。年均 SOC 密度变化速率在空间格局上呈西部、西北部高于东部、东南部，更高于东北部、西南部(图3)。大体分为三级：西部明月山和东南部黄草山是变化高值区；高滩河西北、大沙河东南部、大沙河中下游河段区是变化较显著的中值区；县城以东，大沙河以北，高滩河与鹤大台地所夹槽谷区是变化低值区。

3 讨论与结论

3.1 讨论

影响 SOC 变化的因子较为复杂，如土壤温度、湿度、氧化还原、水土流失和植物生物量等，而这些条件又受制于气候、土质、植被、人类活动等驱动力，且影响因子在组合上的任何变化都会改变农田 SOC 的质和量。其中 SOC 密度初始值、土壤全氮密度以及 C/N 和土壤颗粒组成对土壤有机碳影响较大。程先福等[21]的研究发现 SOC 密度初始值对农田表土 SOC 密度的影响最大且呈负相关关系。本研究也表明，SOC 密度的初始值越高，未来 30 a 垫江县 SOC 密度年均变化速率越小。农田 SOC 存在容纳上限，SOC 含量越高，短期内越难显著地提升；反之，通过合理耕作、施肥、管理等措施，在短期内能明显提升 SOC 含量[22-23]。研究区在相同耕作、投入和管理条件下，SOC 密度初始值高的北部和东北部，SOC 密度的提升速率低于相对较低的中部、南部和东南部。土壤全氮密度及 C/N 对农田表层 SOC 密度的影响仅次于 SOC 密度初始值，与土壤 SOC 呈正相关关系。土壤全氮密度和 C/N 值越大，未来 30 a 垫江县 SOC 密度的变化速率越大。课题组通过对前 30 a 垫江县 SOC 动态研究也发现全氮密度与 C/N 存在一定依赖性，土壤中 N 的积累往往伴随着碳的增加。

国家发展进程的不断推进，研究区耕地面积会随着区域发展需求发生相应的改变。耕地面积的增加或减少，人为扰动加大与减少都将导致研究区土壤 SOC 密度、储量发生变动[24-25]。这与本文在假设研究区耕地面积不变情况下得出的结论有出入。运用模型方法对农田土壤碳库及固碳潜力模拟已成为目前研究农田 SOC 的一种重要方法与途径，本文利用生物地球化学模型 DNDC，仅选取 IPCC AR4 报告中的 BCCR__BCM 2.0 的 B1 模式下未来气温和降水预测结果，对川东平行岭谷区垫江县未来 30 a 的农田 SOC 的变化趋势进行模拟，略显单薄。要准确、有效地预测本研究区农田 SOC 的变化趋势，不仅要收集更多的样点以及不同作物的土壤数据进行模型的参数率定与验证，还需进行更多预测气候模式下的模拟研究。此外，本研究是在以统计资料与实测数据为基础的数据库的支持下展开的，其结果与统计资料的准确性及实测数据的精度有密切关系，这也会导致模拟结果与实际存在一定偏差。

3.2 结论

本研究采用相关系数 r 和相对 RMSE(root mean square error)2 个指标验证了 DNDC 模型对土壤有机碳的模拟效果，二者相关系数 r 为 0.981，达到了 0.01 水平下的极显著相关关系；模拟值和观测值的 RMSE 值为 16%，说明模拟的效果较好。DNDC 模型适合于大尺度、长时间范围的农田 SOC 的时空格局模拟，伴随时间的推移，模型模拟结果趋于稳定，且与实测值越接近，模拟结果越理想。

本文借助 DNDC 模型对川东平行岭谷典型县未来 30 a 农田 SOC 密度进行模拟，结果显示未来 30 a 垫江县农田 0~20 cm 土层 SOC 密度以及储量都将呈现出明显增加的态势。其中 SOC 密度由 2011 年的 23 798.68 kg(C)·hm^{-2} 增加到 2041 年的 26 435.70~31 890.23 kg(C)·hm^{-2}，单位面积碳增量 2 637.07~8 091.55 kg(C)·hm^{-2}，新增固碳量 2.7×10^5 t~8.3×10^5 t。

未来 30 a 研究区 SOC(密度和储量)变化速率整体上均呈现出逐渐增加趋势。DNDC 模型模拟出 2011—2041 年农田 0~20 cm 土层 SOC 密度年均增速率是 87.90~269.72 kg(C)·hm^{-2}·a^{-1}，远远高于 1989—2011 年农田 0~20 cm 土层 SOC 密度年均增长值 72.11 kg(C)·hm^{-2}·a^{-1}，增长幅度高达 21.90%，总体上将呈现出比较明显的碳增汇效应。

DNDC 模型模拟结果显示，研究区未来 30 a 丢碳面积比例为 31.62%、固碳面积比例为 58.14%、相对平衡的面积比例为 10.24%。固碳面积大于丢碳面积与相对平衡面积之和，将打破课题组之前 1980—2011 年垫江县固碳面积与丢碳、平衡面积之和的持平状态，三者之间的显著性将逐渐凸显。

参考文献 References

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623–1627
[2] 于东升，史学正，孙维侠，等. 基于 1: 100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. 应用生态学报，2005, 16(12): 2279–2283
Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1: 1 000 000 soil database[J].

Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(12): 2279–2283
[3] 吴乐知，蔡祖聪．基于长期试验资料对中国农田表土有机碳含量变化的估算[J]．生态环境学报, 2007, 16(6): 1768–1774
Wu L Z, Cai Z C. Estimation of the change of topsoil organic carbon of croplands in China based on long-term experimental data[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6): 1768–1774
[4] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298(5870): 156–159
[5] 王绍强，周成虎，李克让，等．中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]．地理学报, 2000, 55(5): 533–544
Wang S Q, Zhou C H, Li K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 533–544
[6] 周涛，史培军，罗巾英，等．基于遥感与碳循环过程模型估算土壤有机碳储量[J]．遥感学报, 2007, 11(1): 127–136
Zhou T, Shi P J, Luo J Y, et al. Estimation of soil organic carbon based on Remote Sensing and Process Model[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(1): 127–136
[7] 揣小伟，黄贤金，赖力，等．基于 GIS 的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应[J]．农业工程学报，2011，27(9): 1–6
Chuai X W, Huang X J, Lai L, et al. Accounting of surface soil carbon storage and response to land use change based on GIS[J]. Transaction of the CSAE, 2011, 27(9): 1–6
[8] 赵永存，史学正，于东升，等．不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究[J]．土壤学报，2005, 42(3): 379–385
Zhao Y C, Shi X Z, Yu D S, et al. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei province, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 379–385
[9] 韩东亮，贾宏涛，朱新萍，等. DNDC 模型预测新疆灰漠土农田有机碳的动态变化[J]．资源科学, 2014, 36(3): 577–583
Han D L, Jia H T, Zhu X P, et al. Using DNDC model to predict soil organic carbon dynamics in a gray desert soil farmland[J]. Resources Science, 2014, 36(3): 577–583
[10] 李悦，郭李萍，谢立勇，等．不同农作管理措施对东北地区农田土壤有机碳未来变化的模拟研究[J]．中国农业科学, 2015, 48(3): 501–513
Li Y, Guo L P, Xie L Y, et al. Modeling the future changes of soil organic carbon under different management practices in upland Soils of Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(3): 501–513
[11] 金琳，李玉娥，高清竹，等. DNDC 模拟中国 20 年农田管理土壤碳变化[J]．土壤通报, 2010, 41(5): 1081–1085
Jin L, Li Y E, Gao Q Z, et al. Analysis of the change of soil carbon under cropland management in China between 1981 and 2000 by DNDC[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(5): 1081–1085
[12] 邵景安，惠辽辽，慈恩，等. 1980-2011 年川东平行岭谷区农田土壤有机碳动态[J]．生态学报, 2014, 34(15): 4347–4360
Shao J A, Hui L L, Ci E, et al. Dynamics of farmland SOC in parallel ridge valley of east Sichuan during 1980-2011[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4347–4360
[13] IPCC. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007 (请核对修改是否正确)
[14] 丁雪丽，韩晓增，乔云发，等．农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制[J]．土壤通报, 2012, 43(3): 737–744
Ding X L, Han X Z, Qiao Y F, et al. Sequestration of organic carbon in cultivated soils: Main factors and their stabilization mechanisms[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 737–744
[15] 史锟，陈卓．宜居山地土壤机械组成对有机碳含量的影响[J]．中国农学通报, 2008, 24(8): 274–278
Shi K, Chen Z. The effect of the concentration of clay organic carbon on particle-size composition in the hill region of the suitable inhabitancy[J]. Chinese Agriculture Science Bulletin, 2008, 24(8): 274–278
[16] 何婷婷，华珞，张振贤，等．影响农田土壤有机碳释放的因子及固碳措施[J]．首都师范大学学报：自然科学版，2007, 28(1): 66–72
He T T, Hua L, Zhang Z X, et al. Factors influence agricultural soil releases SOC and measures fix C[J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2007, 28(1): 66–72
[17] 姜勇，庄秋丽，梁文举．农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]．生态学杂志, 2007, 26(2): 278–285
Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farm land ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(2): 278–285
[18] 王峰，翁伯琦，王义祥．土地利用方式和经营管理对土壤有机碳库及其组分影响的研究进展[J]．福建农业学报，2009, 24(3): 270–278
Wang F, Weng B Q, Wang Y X. Advance in research on effects of land use and management on soil carbon stock and fractions[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2009, 24(3): 270–278
[19] 王德营，姚艳敏，司海青，等．黑土有机碳变化的 DNDC 模拟预测[J]．中国生态农业学报, 2014, 22(3): 277–283

Wang D Y, Yao Y M, Si H Q, et al. Using DNDC model to simulate and predict changes in black soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(3): 277–283
[20] 巴特尔·巴克, 彭镇华, 张旭东, 等. 生物地球化学循环模型 DNDC 及其应用[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1208–1212
Batur B, Peng Z H, Zhang X D, et al. Biogeochemical model DNDC and its application[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(6): 1208–1212
[21] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1): 64–67
Cheng X F, Shi X Z, Yu D S, et al. Spatial variance and distribution of total nitrogen and organic matter of soil in Xingguo county of Jiangxi, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(1): 64–67
[22] 杨永辉, 武继承, 张洁梅, 等. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 258–266
Yang Y H, Wu J C, Zhang J M, et al. Effect of tillage method on soil water infiltration, organic carbon content and structure[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 258–266
[23] 许咏梅, 刘骅, 王西和. 长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量演变[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 154–162
Xu Y M, Liu H, Wang X H. Evolution of soil organic carbon and crop yield under long-term fertilization in grey desert soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(2): 154–162
[24] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99–105
Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. Advance in Earth Science, 2005, 20(1): 99–105
[25] Balesdent J. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 485–493